一种 K 波段接收机的研制

王凯[1,2,3]，闫浩[1,2,3]，马军[1,2,3]，陈卯蒸[1,2,3]，曹亮[1,2,3]，宁云炜[1,2,3]，段雪峰[1,2,3]，李健[1,2,3]，项斌斌[1,2]

（1. 中国科学院新疆天文台，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院射电天文重点实验室，江苏 南京 210008；3. 新疆微波技术重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：射电天文是通过接收和处理无线电波以此研究宇宙天体的一门学科，微波接收机则是射电天文观测的核心接收设备。结合中国科学院新疆天文台南山 25 米射电望远镜现有 K 波段制冷接收机及未来 Q 波段毫米波观测需求，本论文提出一种 K 波段常温接收机研制，该接收机射频工作频率 22-24.2GHz，经混频最终输出 3.95-6.15GHz 的中频信号，主要用于在 K 波段开展强度校准方法实践及大气不透明度测量。最终采用冷热负载法测试 K 波段常温接收机噪声温度为 402.2K（理论计算为 410.6K），标准噪声源为 166.3K 也满足设计需求，结合斩波轮校准机械结构，该 K 波段接收机已经具备开展强度校准及大气不透明度测试功能，相关工作也可为南山 25 米射电望远镜未来 Q 波段毫米波观测做技术预研。

关键词：接收机；射电天文；K 波段；强度校准；不透明度

中图分类号：P111.5；文献标识码：A

射电天文学是通过接收电磁波来研究宇宙天体的一门学科[1]。由于射电源辐射的信号都极其微弱，需要将微弱的射电信号从背景噪声中提取出来。为此，射电望远镜应运而生，其主要功能是接收并汇聚微弱的电磁波信号至天线焦点处。对于二次反射结构的卡塞格伦天线而言[2]，副反射面焦点处的微波接收机主要负责将射电望远镜收集到的射电信号经放大、滤波、变频等环节后送入数字终端并进行处理[3,4]，以满足不同的科学观测需求，如图 1 所示。

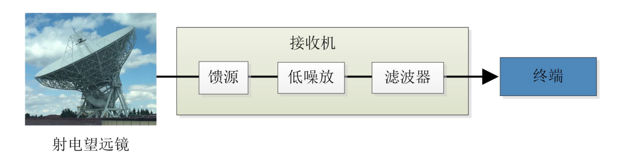


图 1 信号传输链路

Fig.1 Signal transmission link

1 K 波段接收机研制需求

1.1 南山 25 米射电望远镜

中国科学院新疆天文台南山 25 米射电望远镜始建于 1992 年，已配备 4 台厘米波段高灵敏度制冷接收机系统，分别为 L 波段、S/X 双频、C 波段和 K 波段制冷接收机，主要用于开展脉冲星、活动星系核、分子谱线及甚长基线干涉观测等[5]。其中，最高工作波段为 K 波段（22-24.2GHz），如图 2 所示。经前期改造过后，南山 25 米天线面板精度已达到 7mm 观测需求，拟开展毫米波观测，现正安装调试 Q 波段（30-50GHz）接收机[6]。




图 2 南山 25 米射电望远镜及 K 波段制冷接收机

Fig.2 Nanshan 25m telescope and K-band cryogenic receiver

*基金项目：国家自然科学基金资助项目（11903073，11973078，11903077，11603064）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目（2019D01A99）；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助。

作者简介：王凯，男，硕士，研究方向：接收机技术。Email:wangkai@xao.ac.cn

通讯作者：闫浩，男，硕士，研究方向：接收机技术。Email:yanhao@xao.ac.cn

1.2 K 波段接收机研制需求

南山 25 米射电望远镜现有的 K 波段双极化制冷接收机系统，主要用于单天线观测（分子谱线、活动星系核快速时变观测）和联测（甚长基线干涉观测）研究，该接收机主要由低温制冷单元、常温微波单元和外围辅助单元等组成。由于毫米波观测中射电信号更容易受到水汽及氧气的吸收作用[7]，结合正在安装调试的 Q 波段制冷接收机的观测需求，毫米波强度校准必须要考虑大气影响。如若在 K 和 Q 波段开展精确的强度校准，尤其是在 22.3GHz 频点上下以及 Q 波段的高频段开展观测，更需要实时获取不透明度值以修正大气吸收。

拟研制 K 波段常温接收机，期望借助此接收机开展常温和高温负载法、斩波轮法的强度校准方法实践；同时开展 K 波段大气不透明度测量研究[8,9]，结合大气辐射转移方程，初步拟采用俯仰扫描非线性拟合的方式（sky-dips）获取对应波段在天顶方向的不透明度值，并与现有南山 25 米射电望远镜 K 波段制冷接收机的测试数据进行比对，验证测试方案的可行性，希望以此积累短厘米波段至毫米波大气不透明度测量方法及经验，并最终应用于未来的 Q 波段毫米波观测中。

2　K 波段常温接收机设计

结合研制需求，该接收机主要用于强度校准及大气不透明度测试，对噪声温度的要求相对低于射电观测设备，故没有对接收机进行制冷设计。该 K 波段常温接收机射频工作带宽为 22-24.2GHz，采取超外差设计，射频信号经放大、滤波、混频后最终输出为 3.95-6.15GHz 的中频信号。该 K 波段接收机主要由馈源网络、噪声源、低噪声放大器、滤波器、混频器、介质本振、中频放大器等器件组成。

2.1 馈源网络设计

K 波段常温接收机最前级为馈源网络，其也是射电信号最先进入接收机的部分。作为整个 K 波段接收机系统的核心部件，馈源网络主要由波纹喇叭、波纹喇叭过渡段、定向耦合器、圆方转换器、极化器组成。波纹喇叭及过渡段（图 3）材料为电解铜，电铸成型，喇叭相位中心距离喇叭口 120mm，喇叭壁厚为 2mm，喇叭口波纹参数（周期 3mm，槽宽 2mm，齿厚 1mm，槽深 3.32mm），工作频率 22-24.2GHz，圆极化轴比 1.0dB。波纹喇叭口面选用聚脂薄膜（MYLAR）进行密封，主要用于避免杂物掉入馈源内部以及保持馈源内部干燥功能。该 K 波段常温接收机选用的密封薄膜 MYLAR 如图 3 所示，厚度为 0.2mm，差损为 0.05dB，噪声约为 0.35K。





图 3 波纹喇叭、过渡段和密封薄膜

Fig. 3 Corrugated horn, transition section and olyester film

定向耦合器主要用于注入标准噪声信号，利用冷热负载法标定该噪声信号用于二次校准所用；极化器用于将进入波纹喇叭的信号转换为左右旋圆极化信号，输出为标准的 WR42 接口；波同转换器用于将 WR42 波导信号转换为同轴信号。上述三个器件如图 4 所示。

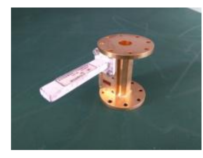




图 4　定向耦合器、极化器和波同转换器

Fig.4 Directional coupler, polarizer and W-C converter

2.2 微波链路设计

*基金项目：国家自然科学基金资助项目（11903073，11973078，11903077，11603064）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目（2019D01A99）；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助。

作者简介：王凯，男，硕士，研究方向：接收机技术。 Email:wangkai@xao.ac.cn
通讯作者：闫浩，男，硕士，研究方向：接收机技术。 Email:yanhao@xao.ac.cn

馈源网络末端输出的同轴信号，经接收机后级微波链路进行放大及下变频处理。微波链路主要由低噪声放大器、射频滤波器、混频器、介质本振、中频滤波器、中频放大器等器件组成。该部分主要功能是将 K 波段馈源网络接收到的射频信号转换为中频信号。

图 5 为微波链路具体设计。首先，利用低噪声放大器对射频信号进行放大，由于放大后的射频信号强度仍无法满足混频器 RF 端的输入功率需求，因此在低噪放之后继续添加一个射频放大器以提升增益，并在两个放大器之间添加了 10dB 衰减器（控制整体增益及减少两个放大器之间的反射）；其次，在射频放大器之后添加一个工作频率 22-24.2GHz 的带通滤波器，滤出需要的射频信号；之后，混频部分选择 18.05GHz 介质本振作为本振参考信号，与射频输入端的 22-24.2GHz 信号进行混频，经混频器最终输出为 3.95-6.15GHz 的中频信号；最后，中频信号再经 3.95-6.15GHz 带通滤波器和中频放大器处理后完成最终输出。

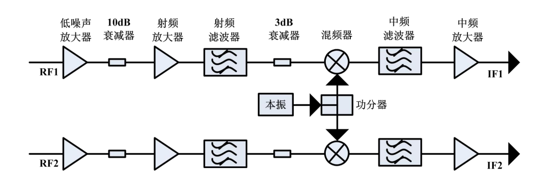


图 5　微波链路具体设计

Fig.5　Specific design of microwave link

3　K 波段常温接收机测试

在实验室分别对K波段接收机各个器件以及接收机整体进行了相关的微波测试，主要测试参数包括天线方向图、增益、回波损耗、噪声系数，以及接收机的带通响应及噪声温度等。

3.1 馈源网络测试

馈源网络工作频率 22-24.2GHz，VSWR≤1.2:1，插入损耗为 0.2dB，在 22 和 23GHz 的天线方向图如图 6 所示：

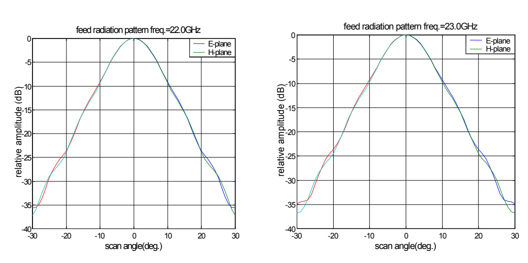


图 6 馈源天线方向图

Fig.6　Feed antenna pattern

3.2 微波链路测试

从简化系统及强度校准需求考虑，暂时不需要双通道观测，故仅搭建了极化器出来后通道 1 的微波链路，通道 2 则在波同转换器后添加了匹配。通道 1 微波链路相关测试如下所示。

3.2.1 低噪声放大器测试

微波链路核心器件低噪声放大器选用伟奇微波的WQLF220-242-30-LNF（增益30dB，噪声系数3dB），在工作频段22-24.2GHz开展噪声系数、增益以及驻波的测试。噪声系数测试选用安捷伦N8975A噪声系数分析仪，在22.8GHz的测试结果为2.983dB，见图7所示。

*基金项目：　国家自然科学基金资助项目（11903073，11973078，11903077，11603064）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目（2019D01A99）；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助。
作者简介：　王凯，男，硕士，研究方向：接收机技术。 Email:wangkai@xao.ac.cn
通讯作者：　闫浩，男，硕士，研究方向：接收机技术。 Email:yanhao@xao.ac.cn



图 7 低噪放噪声系数测试结果

Fig. 7 Test results of LNA noise coefficient

低噪声放大器增益及驻波测试选用安捷伦安捷伦 E8363C 矢量网络分析仪。在 23.1GHz 增益的测试结果为 28.637dB，在 23.1GHz 驻波的测试结果为 1.5625，如图 8 所示。

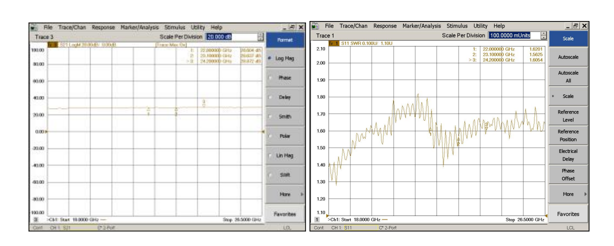


图 8 低噪声放大器增益及驻波测试结果

Fig.8 Test results of gain and standing wave of LNA

3.2.2 带通滤波器测试

射频部分 22-24.2GHz 带通滤波器选用恒伟微波的 HWBPF220242(插损 0.7dB,驻波 1.4)。在 23.1GHz 插损的测试结果为 0.57dB，驻波的测试结果为 1.3，如图 9 所示。

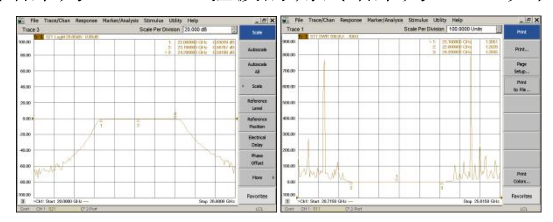


图 9 射频带通滤波器插损及驻波测试结果

Fig.9 Test results of insertion loss and standing wave of RF band-pass filter

3.2.3 混频器测试

混频器选用 Marki MM1-0424S（转换插损 9 dB，端口隔离度≤-30 dB）。在 23.1GHz 插损的测试结果为 8dB，在 23.1GHz 的 LO-RF 隔离度测试结果为-49.9 dB，LO-IF 隔离度测试结果为-31.9dB，RF-IF 隔离度测试结果为-34.8dB，如图 10 所示。

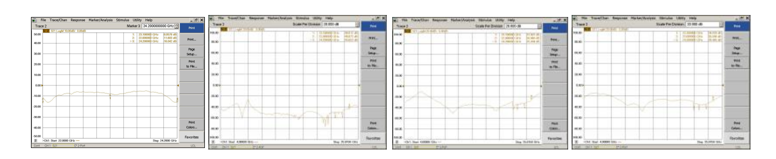


图 10 混频器插损及端口隔离度测试结果

Fig.10 Mixer insertion loss and port isolation test results

3.2.4 中频放大器测试

经混频后所选用的中频放大器为 MITEQ AFS3-04000800-20-10P-4（增益 30dB，噪声系数 3dB）。在 5.1GHz 增益的测试结果为 29.532dB，回波损耗的测试结果为 13.656dB，如图 11 所示。

*基金项目： 国家自然科学基金资助项目（11903073，11973078，11903077，11603064）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目（2019D01A99）；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助。

作者简介： 王凯，男，硕士，研究方向：接收机技术。 Email:wangkai@xao.ac.cn
通讯作者： 闫浩，男，硕士，研究方向：接收机技术。 Email:yanhao@xao.ac.cn

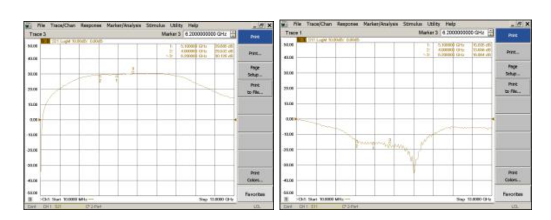


图 11　中频放大器增益及回波损耗测试结果

Fig.11　IF amplifier gain and return loss test results

3.2.5 噪声温度测试

由于接收机系统的噪声温度主要取决于接收机前端无源器件的插损和有源器件的噪声和增益，在整个系统链路中插损 L 计算如式 1 所示，其中 Pi 为输入功率，Po 为输出功率。

$$L(dB) = 10\log_{10}(\frac{P_i}{P_o}) \tag{1}$$

增益 G_A 计算如式 2 所示：

$$G_A = \frac{1}{L} = \frac{P_o}{P_i} \tag{2}$$

由此可以计算出无源器件的增益，如式3所示：

$$G_A = \frac{1}{10^{\frac{L(dB)}{10}}} \tag{3}$$

级联系统的噪声温度计算如式4所示：

$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_{A1}} + \frac{T_{e2}}{G_{A1}G_{A2}} + \ldots \tag{4}$$

总增益为各部分增益的叠加，如式5所示：

$$G(dB) = G_{A1} + G_{A2} + G_{A3} + \ldots \tag{5}$$

根据噪声级联的方式对K波段接收机的噪声温度进行理论计算[10]，计算结果为410.6K。K波段接收机噪声温度T_{rec}计算如式6所示，式中T_{amb}和V_{amb}分别是常温黑体温度及接收机对应的功率输出，T_{cold}和V_{cold}分别是低温黑体温度及接收机对应的功率输出，其中接收机中频输出功率值由安捷伦N1914A功率计和E9300A功率探头（DC-18GHz）获取。

$$T_{rec} = \frac{T_{amb} - \frac{V_{amb}}{V_{cold}} T_{cold}}{\frac{V_{amb}}{V_{cold}} - 1} \tag{6}$$

K 波段接收机定向耦合器耦合标准噪声用于二次校准，噪声源选用 NOISEWAVE 的 NW20G25-35W。在低温黑体负载（冷负载）覆盖在接收机馈源口面时开启或者关闭噪声源，再结合冷热负载法，标准噪声 T_{cal} 计算如式 7 所示，式中 V_{cal} 为冷负载下开启噪声源时接收机对应的功率输出。

$$T_{cal} = \frac{V_{cal} - V_{cold}}{V_{amb} - V_{cold}} \cdot (T_{amb} - T_{cold}) \tag{7}$$

之后，使用经典的冷热负载法对K波段接收机进行噪声温度T_{rec}测试及标准噪声T_{cal}的标定，测试数据及结果见表1。其中，$T_{rec_average}$为402.18K，$T_{cal_average}$为166.32K。

*基金项目：　国家自然科学基金资助项目（11903073，11973078，11903077，11603064）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目（2019D01A99）；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助。

作者简介：　王凯，男，硕士，研究方向：接收机技术。 Email:wangkai@xao.ac.cn
通讯作者：　闫浩，男，硕士，研究方向：接收机技术。 Email:yanhao@xao.ac.cn

表1 K波段接收机噪声温度及标准噪声测算

Table 1 Noise temperature and standard noise calculation of K-band receiver

T_{amb} (K)	V_{amb} (uw)	T_{cold} (K)	V_{cold} (uw)	V_{cal} (uw)	T_{rec} (K)	T_{cal} (K)
298.79	7.879	77.3	5.398	7.328	404.6	172.3
298.62	7.893	76.8	5.409	7.287	406.2	167.7
298.44	7.946	76.1	5.406	7.216	397.1	158.4
298.13	7.863	76.6	5.388	7.308	405.7	171.9
298.26	7.812	76.9	5.326	7.137	397.3	161.3

结合具备常温黑体斩波功能及0-90度仰角可调的强度校准机械结构，该K波段常温接收机已可以开展斩波轮法强度校准测试及大气不透明度测量，如图12所示。

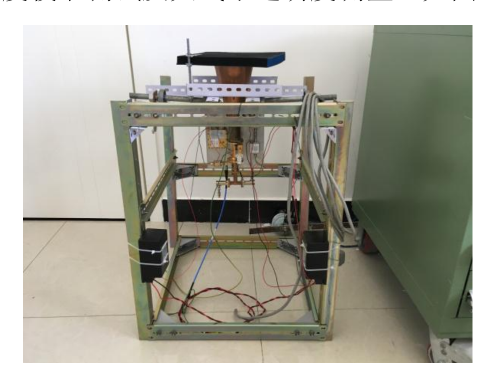


图 12 K 波段接收机强度校准测试平台

Fig.12 K-band receiver calibration test platform

3.2.6 K 波段大气不透明度测试

结合研制完成的 K 波段常温接收机及其俯仰可调机械结构，在南山站分别选取 90、80、70、60、50、45、40、30、25、20、15、10、5 度十三个仰角进行总功率采集，之后采用非线性拟合方式，初步得到在 22-24.2 GHz 频段内天顶方向上的实时不透明度值为 0.12655，拟合曲线如图 13 所示。

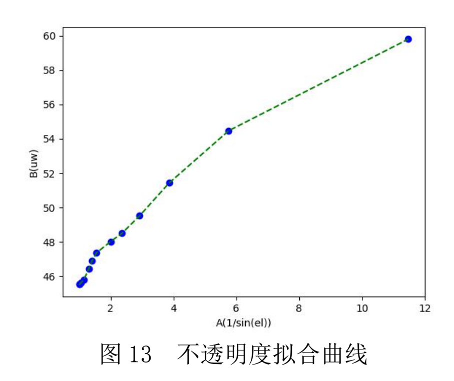


图 13 不透明度拟合曲线

Fig.13 Atmospheric opacity fitting curves.

4 结论

本文结合射电天文微波接收机及其强度校准相关需求，提出一种 K 波段常温接收机设计，该接收机射频工作频率 22-24.2GHz，经混频最终输出 3.95-6.15GHz 的中频信号，主要用于在 K 波段开展强度校准方法实践及大气不透明度测量。最终采用冷热负载法测试 K 波段常温接收机噪声温度为 402.2K（理论计算为 410.6K），标准噪声源为 166.3K 也满足设计需求，接收机最终中频输出频谱动态范围约 30dB，功率幅度约为-50dBm，结合斩波轮校准机械结构，该 K 波段接收机已经具备开展强度校准及大气不透明度测试功能（初步测试对应波段天

*基金项目： 国家自然科学基金资助项目（11903073，11973078，11903077，11603064）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目（2019D01A99）；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助。

作者简介： 王凯，男，硕士，研究方向：接收机技术。 Email:wangkai@xao.ac.cn

通讯作者： 闫浩，男，硕士，研究方向：接收机技术。 Email:yanhao@xao.ac.cn

顶方向不透明度值约为 0.126），相关工作也可为南山 25 米射电望远镜未来 Q 波段毫米波观测做技术预研。

参考文献

[1] 王娜. 新疆奇台 110 米射电望远镜[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2014,44(8):783-794.
Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope[J].Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014,44(8):783-794.

[2] 项斌斌,王从思,王伟,等.基于机电耦合的反射面天线副面位置调整方法[J].系统工程与电子技术,2018,40(03):489-497.
Xiang B B, Wang C S, Wang W, et al. Adjustment method of subreflector position of reflector antennas based on electromechanical couple theory[J]. Systems engineering and electronic technology, 2018, 40(03):489-497.

[3] 陈卯蒸,刘奇,马军,等.大口径射电望远镜超宽带接收机技术发展[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2017,47(05):35-47.
Chen M Z, LIU Q, Ma J, et al. Ultra-wideband receiver technology development for radio astronomical large aperture tele-scope[J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017,47(05):35-47.

[4] 马军,裴鑫,王娜，等.QTT 超宽带多波束信号接收与处理系统[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2019,49(09):6-18.
Ma J, Pei X, Wang N, et al. Ultra wideband and multi-beam signal receiving and processing system of QTT[J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019,49(09):6-18.

[5] 陈勇,孙正文,闫浩,等.新疆天文台 26 米望远镜 L 波段接收机线-圆偏振的转换[J].天文研究与技术,2019,16(03):262-267.
Chen Y, Sun Z W, Yan H, et al. Conversion of Line Polarization to Circular Polarization in L Band Receiver of 26m Telescope in Xinjiang Astronomical Observatory[J]. ASTRONOMICAL RESEARCH AND TECHNOLOGY, 2019,16(03):262-267.

[6] 陈卯蒸,马军，覃律,等. Q 波段脊过渡正交模耦合器设计[J]. 电子科技大学学报, 2018, 47(2)：178-182.
Chen M Z, Ma J, Qin L, et al. Design of a Q Band Orthomode Transduer Based on the Ridged Waveguide Connection[J]. Journal of University of Electronic Science and technology of China, 2018, 47(2)：178-182.

[7] 王凯，陈卯蒸，马军,等.射电天文毫米波接收机强度校准[J].天文学报, 2018,59(5):1-14.
Wang K, Chen M Z, Ma J, et al. The Amplitude Calibration of Radio Astronomy Millimeter Wave Receiver[J]. ACTA ASTRONOMICA SINICA, 2018,59(5):1-14.

[8] 杨戟,曹逸庭,黄树频.在 97.8GHz 处测量地球大气的不透明度[J].天文学报,1998(03):333-336.
Yang J, Cao Y T, Huang S F. Measurement of the opacity of the earth's atmosphere at 97.8 GHz[J]. ACTA AS-TRONOMICA SINICA, 1998(03):333-336.

[9] 周明峰,姚骑均,李升,等.羊八井 460 GHz 大气不透明度的测量[J].天文学报,2011,52(01):62-72.
Zhou M F, Yao Q J, Li S, et al. Measurement of 460 GHz atmospheric opacity in Yangbajing[J]. ACTA AS-TRONOMICA SINICA, 2011,52(01):62-72.

*基金项目： 国家自然科学基金资助项目（11903073，11973078，11903077，11603064）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目（2019D01A99）；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助。

作者简介： 王凯，男，硕士，研究方向：接收机技术。 Email:wangkai@xao.ac.cn
通讯作者： 闫浩，男，硕士，研究方向：接收机技术。 Email:yanhao@xao.ac.cn

[10] 王凯,闫浩,段雪峰,等.K波段常温接收机噪声注入定标方法分析研究[J].天文研究与技术,2020,17(04):439-445.
Wang K, Yan H, Duan X F, et al. Analysis and Research on Noise Injection Calibration Method of K-band Ambient Temperature Receiver[J]. ASTRONOMICAL RESEARCH AND TECHNOLOGY, 2020,17(04):439-445.

Development of a K-band Receiver

WANG Kai[1,2,3], YAN Hao[1,2,3], MA Jun[1,2,3], CHEN Maozheng[1,2,3], CAO Liang[1,2,3], NING Yunwei[1,2,3], DUAN Xuefeng[1,2,3], LI Jian[1,2,3], XIANG Binbin[1,2]

(1. Xinjiang Astronomical observatory, Chinese Academy of Sciences, Xinjiang, Urumqi, 830011, China; 2.Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Microwave Technology, Urumqi 830011, China)

Abstract: Radio astronomy is a subject of studying cosmic objects by receiving and processing radio waves. Microwave receiver is the core receiving equipment of radio astronomy observation. Considering the present K-band cryogenic receiver and future Q-band millimeter-wave observation requirements of the Nanshan 25-meter radio telescope at the Xinjiang Astronomical Observatory of the Chinese Academy of Sciences, this paper presents a design of a K-band room temperature receiver. The receiver works at 22-24.2 GHz and eventually outputs 3.95-6.15 GHz IF signal through mixing. It is mainly used for amplitude calibration method practice and atmospheric opacity measurement in K-band. Finally, the noise temperature of K-band room temperature receiver is 402.2K (theoretical calculation is 410.6K), and the standard noise source is 166.3K. Combining with the mechanical structure of chopper wheel calibration, the K-band receiver has the functions of amplitude calibration and atmospheric opacity measurement, and this work can pre-research on technology for Q-band millimeter-wave observations of Nanshan 25m radio telescope for the future.

Key words: Receiver; Radio astronomy; K-band; Amplitude calibration; Opacity

*基金项目：国家自然科学基金资助项目（11903073，11973078，11903077，11603064）；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划（2020-XBQNXZ-018）；新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目（2019D01A99）；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助。
作者简介：王凯，男，硕士，研究方向：接收机技术。Email:wangkai@xao.ac.cn
通讯作者：闫浩，男，硕士，研究方向：接收机技术。Email:yanhao@xao.ac.cn